

// Batterien: Vom Material zum
Produkt und wieder zurück
// Batteries: from the material to
the product and back again

// Batterien: Vom Material zum Produkt und wieder zurück

// Batteries: from the material to the product and back again



Erkenntnisse des Weltklimarates, die zunehmende Wahrnehmung der ersten Folgen des Klimawandels in der Bevölkerung sowie die wöchentlichen Demonstrationen der „Fridays for Future“-Bewegung schlugen sich in der Europawahl im Mai 2019 nieder und drängten die Politik zu deutlich ambitionierteren Klimaschutzzielen. So wurde im Herbst 2019 auf europäischer Ebene der Green Deal beschlossen, der die Transformation Europas zum weltweit ersten klimaneutralen Kontinent bis 2050 zum Ziel hat.

Findings published by the Intergovernmental Panel on Climate Change, the growing public awareness of the first consequences of climate change and the weekly demonstrations of the “Fridays for Future” movement had an impact on the European elections in May 2019 pushing politicians to set far more ambitious climate protection targets. In autumn 2019, for example, the Green Deal was adopted on a European level, and it is aimed at transforming Europe into the world’s first climate-neutral continent by 2050.

// Focus



LEITBILD KLIMANEUTRALITÄT BIS 2050

Auch auf internationaler Ebene vollzieht sich dieser Paradigmenwechsel: Im Januar 2020 standen anlässlich des World Economic Forum in Davos erstmals Umwelt- und Klimarisiken an der Spitze des Rankings der größten Bedrohungen für die Weltwirtschaft. Das Ziel der Klimaneutralität erfasste nun auch Branchen wie die energieintensive Grundstoffindustrie (Chemie, Stahl, Zement), den Flugverkehr und die internationale Seeschifffahrt, die bislang allenfalls moderate Klimaschutzvorgaben zu erfüllen hatten. Deren Transformation ist ohne grünen Wasserstoff – als Rohstoff, Hilfsstoff und Energieträger – und seine synthetischen Folgeprodukte nicht möglich.

Entsprechend verkündete die Bundesregierung im Juni die Nationale Wasserstoffstrategie, nach der Wasserstoff zukünftig neben Strom ein zentraler Energieträger sein wird. Neben der Formulierung klarer Ziele für die Herstellung von Wasserstoff aus Wasser mittels Elektrolyse wurden mit neun Milliarden Euro zusätzliche Mittel zur Förderung des Markthochlaufs von Wasserstofftechnologien bereitgestellt. Im August 2020 folgte das Kohleausstiegsgesetz (Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung) mit der Vorgabe, stufenweise die Erzeugung von Strom aus Kohle bis zum Jahr 2038 auf null herunterzufahren. Zusammen mit dem bereits beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie Ende 2022 wird sich die Stromerzeugung in Deutschland somit massiv in Richtung regenerativ erzeugten Stroms verschieben. Hier gab es im Jahr 2020 Gutes zu berichten: Etwa 46% des erzeugten Stroms kamen aus regenerativen Quellen und somit ca. 5% mehr als im Jahr zuvor. Der Covid-19-bedingte geringere Strombedarf und ein sonniges und windreiches Jahr haben dazu geführt, dass die Bundesrepublik Deutschland ihr selbstgestecktes Ziel einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 40% im Vergleich zum Referenzjahr 1990 doch noch erreichen konnte.

AMBITIONIERTERTE CO₂-ZIELE FÜR DEUTSCHLAND BIS 2030

Die vielleicht wichtigste Entscheidung fiel jedoch im Dezember 2020 auf europäischer Ebene: Der Europäische Rat beschloss auf dem Weg zur Klimaneutralität der Europäischen Union auch eine Verschärfung der Mittelfristziele für das Jahr 2030 auf minus 55% statt wie bisher minus 40%. Für Deutschland könnte das bedeuten, dass bis 2030 eine Treibhausgasreduktion von 65% statt wie bisher angestrebt von 55% erreicht werden muss – im Vergleich zum Referenzjahr 1990. Dies wird den Druck zur Emissionsminderung insgesamt deutlich erhöhen, insbesondere in jenen Sektoren, die bisher nur wenig zur CO₂-Reduktion beigetragen

THE POLICY GUIDELINE OF CLIMATE NEUTRALITY BY 2050

An international paradigm shift is underway: in January 2020, on the occasion of the World Economic Forum in Davos, environmental and climate risks topped the ranking of the greatest threats to the global economy for the first time. Climate neutrality as a goal now also extends to sectors such as the energy-intensive raw material industry (chemicals, steel and cement), air traffic and international shipping which previously had to meet only moderate climate protection targets at best. Their transformation will not be possible without green hydrogen – as a raw material, additive and as an energy carrier – as well as its synthetic derivatives.

Consequently, the German government announced the National Hydrogen Strategy in June, according to which hydrogen will become a central energy carrier alongside electricity. In addition to formulating decisive targets for the production of hydrogen from water through electrolysis, nine billion euros in additional funding was made available to promote the market ramp-up of hydrogen technologies. In August 2020, the Coal Phase-out Act (Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung) followed up with the requirement to gradually scale down the generation of electricity from coal to zero by 2038. Together with the already decided phase-out of nuclear energy by the end of 2022, electricity generation in Germany will shift massively towards electricity generated from renewable energy sources. In this regard, there were some good things to report about in 2020: about 46% of the electricity was generated from renewable energy sources, which is about 5% more than the year before. The lower demand for electricity as a result of COVID-19 and a sunny and windy year meant that Germany was able to achieve its self-imposed target of a 40% reduction in CO₂ emissions compared to the reference year 1990.

AMBITIOUS CO₂ TARGETS FOR GERMANY BY 2030

Perhaps the most important decision, however, was made at the European level in December 2020: the European Council decided to tighten the medium-term targets for the year 2030 to minus 55% instead of minus 40% on the way to a climate-neutral European Union. For Germany, this could mean that a greenhouse gas reduction of 65% instead of the previous target of 55% must be achieved by 2030 – compared to the reference year 1990. This will significantly increase the urgency of reducing emissions overall, especially in those sectors that have so far contributed little to CO₂ reduction.

Country	New registrations	Change vs. prior year in percent
China	1,246,000	↗ 3
Germany	394,632	↗ 264
USA	322,400	↘ -2
France	194,700	↗ 180
Great Britain	175,100	↗ 140
Norway	108,200	↗ 27
Sweden	94,080	↗ 125
Netherlands	87,950	↗ 31
Italy	59,950	↗ 250
Canada	53,180	↗ 4
Japan	29,350	↘ -25
Austria	23,610	↗ 107
Worldwide	3,183,012	↗ 38

haben. Genannt seien hier insbesondere der Verkehr, aber auch der Gebäudesektor und die Landwirtschaft. Doch gerade bei der individuellen Mobilität, also bei der privaten Nutzung von Kraftfahrzeugen, hat sich im Jahr 2020 eine Entwicklung massiv beschleunigt, die vor zehn Jahren mit ersten Serienmodellen begonnen hat: der Einstieg in die Elektromobilität.

MOBILITÄT OHNE EMISSIONEN

Während erneuerbare Energien Jahr für Jahr einen steigenden Anteil an der Gesamtstromerzeugung bereitstellen, basiert unsere Mobilität auf der Verbrennung von fossilen Kohlenwasserstoffen. Dies gilt für den Personenverkehr, den Güterverkehr auf der Straße, den nicht-elektrifizierten Schienenverkehr und den gesamten Flug- und Schiffsverkehr. Die Mobilität im Straßenverkehr in der Bundesrepublik Deutschland beruht somit abgesehen von geringen Anteilen an Biokraftstoffen fast vollständig auf Mineralöl und den hieraus gewonnenen Kraftstoffen Benzin und Diesel. Im Gegensatz zum elektrischen Strom ist Deutschland beim Erdöl jedoch zu fast 100 % auf Importe angewiesen.

HERAUSFORDERUNG STRASSENVERKEHR

Der weiterhin hohe Wille zur individuellen Mobilität mit dem eigenen Pkw sowie die stetig zunehmenden Gütermengen im Straßenverkehr haben zur Folge, dass die CO₂-Emissionen aus dem Verkehrssektor in Deutschland seit dem Jahr 1990 nahezu konstant geblieben sind. In absoluten Zahlen bewegen sich die Werte zwischen 160 und 170 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten (mit Ausnahme des Covid-19-Jahres 2020). Einer ständig besser werdenden Motorentechnologie mit reduziertem Kraftstoffverbrauch

Notable here are transport, the building sector and agriculture. In particular in the area of individual mobility, that is the private use of motor vehicles, a development that began 10 years ago with the first series-produced models massively accelerated in 2020: the transition towards electromobility.

EMISSION-FREE MOBILITY

While renewable energy sources account for an ever-increasing share of total electricity generation each year, our mobility is still based on the combustion of fossil hydrocarbons. This applies to personal transport, freight transport by road, non-electrified rail transport and all air and sea transport. Mobility in road transport in the Federal Republic of Germany is therefore based almost entirely on mineral oil and the fuels derived from it, petrol and diesel, apart from minor shares of biofuels. In contrast to electricity, however, Germany is almost entirely dependent on imports when it comes to oil.

THE CHALLENGE OF ROAD TRANSPORT

The continued strong desire for individual mobility with one's own car and the steadily increasing volume of goods transported by road have meant that CO₂ emissions from the transport sector in Germany have remained almost constant since 1990. In absolute terms, the values range between 160 and 170 million tonnes of CO₂ equivalents (with the exception of the COVID-19 year 2020).

// Focus



standen im Wesentlichen vier Faktoren gegenüber, welche diese technischen Fortschritte kompensierten:

1) die kontinuierliche Zunahme der Motorisierung, 2) das kontinuierlich zunehmende Fahrzeuggewicht, 3) die zunehmende Marktdurchdringung von SUVs und 4) ein teilweise starker Rückgang der Dieselseufahrzeuge nach dem Dieselskandal im Jahr 2015. Weiterhin muss festgestellt werden, dass zahlreiche staatliche Anreize zur Reduktion des Individualverkehrs und zum Umstieg auf den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) in Deutschland nur wenige Anhänger fanden, was primär am mangelnden Angebot und den vermeintlich hohen Kosten liegt. Es soll hier jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass diese Problematik nicht nur auf Deutschland beschränkt ist. Ganz im Gegenteil: In fast allen Ländern der Welt stellt der Mobilitätssektor bezüglich einer gewünschten CO₂-Reduktion ein Sorgenkind dar.

DER BATTERIEANTRIEB

Von zentraler Bedeutung für die Reduktion der Treibhausgasemissionen und anderer negativer Umwelteffekte sind elektrisch betriebene Fahrzeuge, deren Markthochlauf beginnt. Diese Fahrzeuge stoßen im Fahrbetrieb kein CO₂ aus. Und auch in der Betrachtung der gesamten Energiekette inklusive Stromherstellung und Batterieproduktion stellt sich der batteriebasierte Elektroantrieb als sehr effizient und vorteilhaft dar. Bei wachsendem Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix nehmen die Vorteile weiter dynamisch zu. Die eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien überzeugen durch hohe Energiedichten, gute Zyklenzahl (d. h. Fahrleistung bzw. Lebensdauer) sowie durch hohe Effizienz beim Laden und Entladen. Zudem konnten über die letzten Jahre hinweg die Kosten dieser Batteriesysteme so weit reduziert werden, dass batteriebetriebene Elektrofahrzeuge mehr und mehr für breite Bevölkerungsschichten erschwinglich werden. Bereits die ersten Serienfahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien, die ab dem Jahr 2010 auf den Markt kamen, erzielten größere Reichweiten als vergleichbare Batteriefahrzeuge in der Vergangenheit mit anderen Batterietypen wie dem Bleiakкумуляtor oder Nickelmetallhydrid-Batterien. Zudem zeigte sich in den ersten Jahren mit diesen Fahrzeugen in Kundenhand, dass sowohl die Sicherheit als auch die Lebensdauer der Lithium-Ionen-Batterie deutlich besser ist als ursprünglich gedacht und z. B. ein Batterieaustausch nach einigen Jahren Betrieb nicht notwendig ist.

Constantly improved engine technology with reduced fuel consumption was offset by four main factors that counteracted these technological advancements: 1. ongoing increase in motorisation, 2. continuously increasing vehicle weight, 3. increasing market penetration of SUVs and 4. a somewhat sharp decline in new diesel vehicles after the diesel scandal in 2015. It should also be noted that various government incentives to encourage a reduction in private transport and a transition to local public transport in Germany have found only few supporters, primarily due to a lack of offers and the supposedly high costs. However, it should not go unmentioned that this problem is not unique to Germany. On the contrary: in almost all countries around the world, the mobility sector is particularly challenging as regards achieving the envisioned reduction of CO₂ emissions.

THE BATTERY DRIVE

Electrically powered vehicles are a key factor when it comes to curbing greenhouse gas emissions and other negative environmental effects. These vehicles do not emit any CO₂ when driven. And when considering the entire energy chain, including electricity generation and battery production, their battery-powered electric drive has again proven to be very efficient and advantageous. With the increasing share of renewable energies in the electricity mix, the advantages continue to advance dynamically. The lithium-ion batteries used here are attractive due to their high energy densities, high cycle numbers (service life) and high efficiency while charging and discharging. In addition, the costs of these battery systems have been brought down over the last few years to such an extent that battery-powered electric vehicles are becoming more and more affordable for a larger segment of the population. The first series-produced vehicles with lithium-ion batteries, launched in 2010, already achieved greater ranges than comparable battery vehicles of the past with other battery types such as lead accumulators or nickel metal hydride batteries. Furthermore, the first years with these vehicles under customer ownership showed that both the safety and longevity of lithium-ion batteries are significantly better than originally thought and that, for example, battery replacement is not necessary already after a few years of operation.



CHINA ALS TREIBER FÜR CO₂-FREIE PKW MIT LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Neben den stetigen technischen Verbesserungen der Lithium-Ionen-Technologie bei gleichzeitig sinkenden Kosten hat die politische Strategie der Volksrepublik China maßgeblich zum Erfolg dieser Technologie geführt. Durch eine klare Fokussierung auf die Lithium-Ionen-Batterie für eine CO₂-freie Mobilität, eine starke Subventionierung von Batterieproduktionskapazitäten und batteriebetriebenen Fahrzeugen, eine Mandatierung der Neuzulassungen und eine dem jeweiligen Technologiestand angepasste Gesetzgebung wurde diesem Antriebssystem der Weg in den Massenmarkt geebnet. Europäische Pkw-Hersteller, die alle einen zweistelligen Prozentanteil ihrer Neufahrzeuge in China verkaufen, konnten sich diesem Trend nicht entziehen. Es ist somit nicht überraschend, dass die Volksrepublik China in den letzten Jahren die globale Zulassungsstatistik für Elektrofahrzeuge angeführt hat und dabei fast ausschließlich Fahrzeuge chinesischer Hersteller zugelassen wurden, weil sie zur Erreichung einer Steuergutschrift ausschließlich komplett in China produzierte Batteriesysteme nutzen mussten.

DIE LITHIUM-IONEN-BATTERIE ALS ENABLER EINER CO₂-FREIEN MOBILITÄT

Bei Lithium-Ionen-Batterien macht man sich zunutze, dass das chemische Element Lithium mit ca. 4 Volt die höchste Spannung liefert. Diese Spannung ist mehr als doppelt so hoch wie bei handelsüblichen Batterien im AA-Rundzellenformat (1,5 Volt). Zudem ist Lithium das drittleichteste chemische Element. Somit sind Lithium-Ionen-Batterien auch deutlich leichter als zum Beispiel Bleibatterien. Innerhalb einer Lithium-Ionen-Batterie bewegen sich Lithium-Ionen beim Laden vom positiven Pol (Kathode) zum negativen Pol (Anode) und beim anschließenden Entladen wieder zurück. An beiden Polen wird das Lithium dabei in Schichtstrukturen eingelagert: an der Anode in Graphit oder Kohlenstoff und an der

CHINA AS A DRIVING FORCE FOR CO₂-FREE CARS WITH LITHIUM-ION BATTERIES

In addition to the constant technical improvements being made to lithium-ion technology while costs are dropping, the political strategy of the People's Republic of China has played a major role in the success of this technology. A clear focus on lithium-ion batteries for CO₂-free mobility, major subsidies for battery production capacities and battery-powered vehicles, a mandate for new registrations and legislature adapted to the current state of technology have paved the way for this drive system to enter the mass market. European car manufacturers, who all sell a double-digit percentage of their new vehicles in China, were not able to escape this trend. It is therefore unsurprising that the People's Republic of China has led the global registration statistics for electric vehicles in recent years, with vehicles from Chinese manufacturers being registered almost exclusively because tax credits were only available for battery systems produced entirely in China.

THE LITHIUM-ION BATTERY AS AN ENABLER OF CO₂-FREE MOBILITY

Lithium-ion batteries take advantage of the fact that the chemical element lithium delivers the highest voltage of about 4 volts. That is more than twice the voltage of standard AA household batteries (1.5 volts). In addition, lithium is the third lightest chemical element. Lithium-ion batteries are much lighter than lead-acid batteries, for example. Inside a lithium-ion battery, lithium ions move from the positive pole (cathode) to the negative pole (anode) while charging and then back again when discharging. At both poles, the lithium is embedded within layer structures: at the anode in graphite or carbon and at the cathode in a lattice of different metals and oxygen.



Kathode in ein Gitter aus unterschiedlichen Metallen und Sauerstoff. Der Einsatz von stabilen „Trägerstrukturen“ für Lithium an beiden Polen der Zelle macht diesen Batterietyp einzigartig und erlaubt das Verschieben von Lithium-Ionen von einem Pol zum anderen in fast unbegrenzter Anzahl. So ist es auch nicht verwunderlich, dass für die Entdeckung eben dieser Schichtstrukturen im Jahr 2019 der Nobelpreis für Chemie an John B. Goodenough (USA), M. Stanley Whittingham (England) und Akira Yoshino (Japan) vergeben wurde. Ihre grundlegenden Arbeiten lieferten die Basis, auf der Sony vor 30 Jahren Lithium-Ionen-Batterien in den Markt einführen konnte.

The use of stable “carrier structures” for lithium at both poles of the cell makes this type of battery unique in that it allows lithium ions to be moved from one pole to the other in almost unlimited quantities. It is therefore not surprising that the Nobel Prize in Chemistry was awarded in 2019 to John B. Goodenough (USA), M. Stanley Whittingham (England) and Akira Yoshino (Japan) for the discovery of precisely these layer structures. Their groundbreaking work provided the foundation on which Sony was able to introduce lithium-ion batteries to the market 30 years ago.

ROHSTOFFE FÜR LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

RAW MATERIALS FOR LITHIUM-ION BATTERIES

Die eingesetzten Materialien einer Lithium-Ionen-Batterie bestimmen im Wesentlichen die Kosten und die Performance. Etwa 70% der Gesamtkosten von Lithium-Ionen-Batterien entfallen auf die Materialien und nur 30% auf Produktion, Abschreibung, Allgemerkosten, R&D und Gewinnmarge. Aber auch die Performance und dabei insbesondere der Energieinhalt und die Sicherheit einer Batterie werden durch die eingesetzten Materialien maßgeblich bestimmt. Aus diesem Grund stehen die Batteriematerialien nach wie vor im Fokus intensiver Entwicklungsarbeiten. Auch heute noch besteht bei allen Materialien großes Entwicklungspotenzial. Außer der Erhöhung des Energieinhalts werden die Materialien in Richtung niedrigerer Kosten, besserer Prozessierbarkeit und Lebensdauer optimiert.

The materials used in a lithium-ion battery largely determine its cost and performance. About 70% of the total cost of lithium-ion batteries is attributable to the materials and only 30% to production, depreciation, overheads, R&D and profit margin. However the materials used also significantly determine battery performance, especially energy content and safety. For this reason, battery materials have been and still are the focus of extensive development work. Even today, there is still great development potential for all materials. In addition to increasing the energy content, the materials are being optimised in terms of costs, processability and service life.



// Professionelle Zellöffnungen und Post-mortem-Analysen ermöglichen es, Schädigungsmechanismen an Batterien zu identifizieren.
// Professional cell openings and post-mortem analyses make it possible to identify damage mechanisms in batteries.



Obwohl die Lithium-Ionen-Batterie nach dem Schlüsselement Lithium benannt ist, liegt der Anteil des Lithiums am Gesamtgewicht einer solchen Batterie bei nur 6–7%. Der Rest entfällt auf andere Metalle wie Nickel, Kobalt oder Mangan (zusammen ca. 60 Gewichtsprozent) und Sauerstoff. Dazu kommen dann noch die weiteren Kernkomponenten der Batterie: Graphit als Anode, ein organischer Elektrolyt, ein Polymerseparator und, ebenfalls nicht zu vernachlässigen, die Stromableiterfolien aus Aluminium und Kupfer. Außerhalb der Batteriezelle kommen dann noch nennenswerte Mengen an Kupferkabel sowie entweder Aluminium oder Edelstahl für den Batteriepack hinzu. Bezieht man den Gewichtsanteil des Lithiums nicht nur auf die einzelne Batteriezelle, sondern auf den gesamten Batteriepack, so reduziert sich der Gewichtsanteil weiter auf teilweise unter zwei Gewichtsprozent.

LITHIUM ALS SCHLÜSSELEMENT

Lithium stellt einen kritischen Rohstoff dar, da es durch kein anderes Element substituiert werden kann. Lithium wird heute zum größten Teil aus Solen von Salzseen in den südamerikanischen Anden gewonnen. In einem komplexen Verdampfungsprozess, basierend ausschließlich auf Sonneneinstrahlung, wird über 18 Monate hinweg die Salzsole mittels fraktionierter Kristallisation bezüglich Lithiumcarbonat angereichert. Dabei verdampfen große Mengen Wasser, um vom ursprünglichem Lithiumgehalt von < 2.000 ppm (= 0,2 Gewichtsprozent) auf ein Konzentrat von ca. neun Gewichtsprozent zu gelangen, welches dann zu Lithiumcarbonat oder zu Lithiumhydroxid (LiOH) hoher Reinheit weiterverarbeitet wird. Nicht zuletzt aus ökologischen Gründen ist die Herstellung von Lithiumhydroxid aus lithiumhaltigen Mineralien wie Spodumen-

Although the lithium-ion battery is named after the key element lithium, the proportion of lithium relative to the total weight of such a battery is only 6–7%. The rest is made up of other metals such as nickel, cobalt or manganese (together approx. 60% by weight) and oxygen. Then there are the other core components of the battery: graphite as the anode, an organic electrolyte, a polymer separator and, also significant, the current-conducting foils made of aluminium and copper. Outside of the battery cell itself, there are also appreciable amounts of copper cable and either aluminium or stainless steel for the battery pack. If the weight percentage of lithium is not only set in relation to the individual battery cell, but to the entire battery pack, the weight percentage is further reduced to less than 2 percent by weight in some cases.

LITHIUM AS A KEY ELEMENT

Lithium is a critical raw material because it cannot be substituted by any other element. Today, most lithium is sourced from salt lake brines in the South American Andes. In a complex evaporation process relying exclusively on solar irradiation, the brine becomes enriched in lithium carbonate through fractional crystallisation over a period of 18 months. Large amounts of water evaporate in order to achieve a concentrate of approx. 9 percent by weight compared to the original lithium content of < 2,000 ppm (= 0.2 percent by weight) which is then further processed to lithium carbonate or lithium hydroxide (LiOH) with a high degree of purity. The production of lithium hydroxide from lithium-containing minerals such as spodumene minerals (LiAl[Si₂O₆]) is more

mineralien (LiAl[Si₂O₆]) eleganter, da sie Lithium im einstelligen Prozentbereich enthalten. Es gibt große Spodumenvorkommen in Australien, China, den USA, Kanada und weiteren Ländern und es wird mehr und mehr Lithium aus dieser mineralischen Quelle gewonnen.

GRAPHITISCHE ANODEN

Aber bereits beim Graphit der Anode sind die natürlichen Vorkommen begrenzt und liegen zu über 60% in China und somit nur in einem einzigen Land mit hohem Eigenbedarf. Und die mechanische Umarbeitung des natürlichen Graphits in kleine kugelförmige Partikel für den Einsatz in der Lithium-Ionen-Batterie verursacht hohe Materialverluste von teilweise mehr als 50%. Hier setzt das Projekt RONDO an, in dem das ZSW zusammen mit Kohlenstoffherstellern versucht, die Verlustrate deutlich zu reduzieren und hierdurch die Ausbeute an verwertbarem Graphit zu steigern. Aber es gibt auch künstlich hergestellte Graphite im Markt, welche auf amorphem Kohlenstoff oder Polymeren beruhen. Die Herstellung von künstlichem Graphit erfordert allerdings sehr hohe Temperaturen und lange Verweilzeiten in Elektroöfen und ist somit sehr stromintensiv. Nur beim Einsatz von grünem Strom ist der Gesamtprozess umweltfreundlich und kann somit erst auf lange Sicht die notwendigen Graphitmengen für den Markthochlauf CO₂-frei produzierter Lithium-Ionen-Batterien liefern.

AUF DEM WEG ZU KOBALTFREIEN KATHODEN

Kobalt ist das vielleicht kritischste Metall in Lithium-Ionen-Batterien. Die Vorräte sind ebenfalls begrenzt und Kobalt ist meist nur ein Beiprodukt bei der Förderung anderer Metalle wie Nickel und Kupfer. Die wenigen reinen Vorkommen von Kobalterzen liegen in der Demokratischen Republik Kongo, wo jedoch ein nennenswerter Teil des Metalls mittels Kinderarbeit in illegalen Minen gewonnen wird. Auch der hohe Preis des Kobalts hat bereits in den letzten Jahren dazu geführt, dass der Anteil dieses Metalls im Kathodenmaterial auf ca. zehn Gewichtsprozent gesunken ist (Nickel-Kobalt-Mangan (NCM-622)) und die nächste Generation an Kathodenmaterialien wird nur noch fünf Gewichtsprozent Kobalt enthalten (NCM-811). Noch weiter fortgeschritten ist Tesla mit dem verwendeten NCA, der bereits heute unter fünf Gewichtsprozent Kobalt enthält. Es laufen derzeit zahlreiche Entwicklungen in der Industrie und der Wissenschaft, den Kobaltgehalt weiter bis auf null abzusenken.

elegant, not least for ecological reasons, as they contain lithium in the single-digit percentage range. Large deposits of spodumene exist in Australia, China, the United States, Canada and other countries, and more and more lithium is being extracted from this mineral source.

GRAPHITE ANODES

Already the natural deposits of graphite for the anode are limited, with more than 60% of them located in China and thus only in one country with a high domestic demand. The mechanical conversion of natural graphite into small spherical particles to be used in lithium-ion batteries results in high material losses of more than 50% in some cases. This is where the RONDO project enters the picture, in which ZSW, together with carbon producers, is seeking to significantly reduce the loss rate and thereby increase the yield of usable graphite. While there are also artificially produced graphites on the market, based on amorphous carbon or polymers, the production of artificial graphite calls for very high temperatures and long dwell times in electric furnaces and is thus very electricity intensive. The entire process is thus only environmentally friendly with the use of green electricity, which means that it will take a long time before the necessary quantities of graphite can be produced for the market ramp-up of CO₂-free lithium-ion batteries.

ON THE WAY TO COBALT-FREE CATHODES

Cobalt is perhaps the most critical metal in lithium-ion batteries. Supplies are limited and cobalt is mostly a by-product of mining other metals such as nickel and copper. The few pure deposits of cobalt ore are in the Democratic Republic of Congo where, problematically, a significant portion of the metal is extracted through child labour in illegal mines. Also because of the high price of cobalt, the proportion of this metal in cathode materials has been reduced to about 10 percent by weight (nickel-cobalt-manganese (NCM-622)), and the next generation of cathode materials will contain only 5 percent cobalt by weight (NCM-811). Tesla is a step ahead with the NCA it uses, as it already contains less than 5 percent cobalt by weight. There are a number of developments underway in the industry and academia to further reduce the cobalt content to zero.

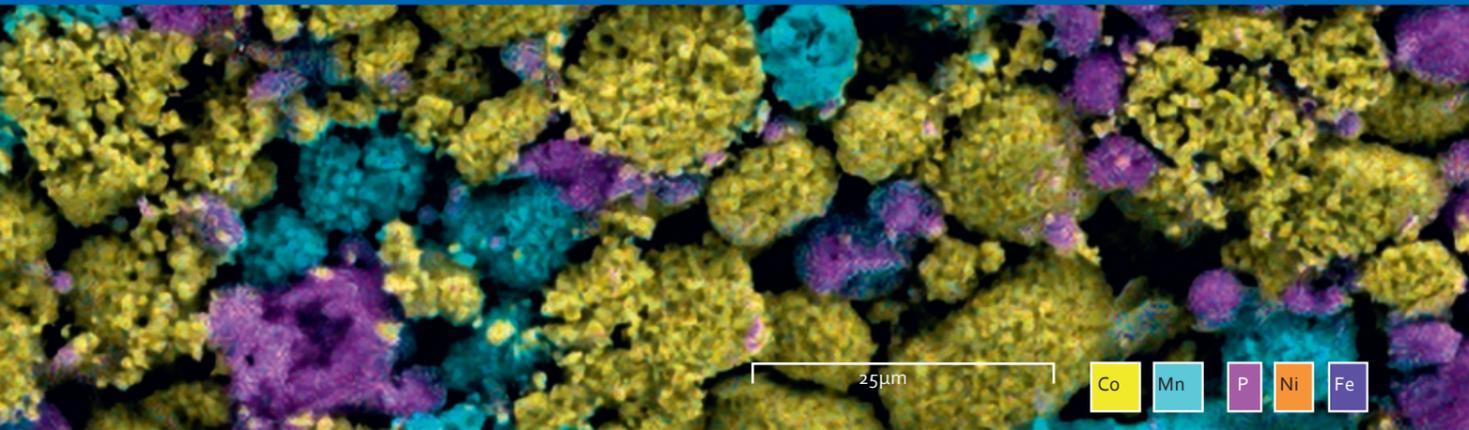


// REM-Aufnahme von durch Rundungsprozesse veredeltem Naturgraphit.
// SEM image of natural graphite upgraded via rounding processes.



// Das ZSW entwickelt seit Jahren kobaltfreie Kathodenmaterialien (REM-Aufnahme) auf der Basis von kobaltfreiem Lithium-Nickel-Manganoxid (NCM).
// ZSW has been developing cobalt-free cathode materials (SEM image) based on cobalt-free lithium nickel manganese oxide (NCM) for several years already.

DIE LITHIUM-IONEN-BATTERIE NEU GEDACHT THE LITHIUM-ION BATTERY REIMAGINED



Um den Kobaltanteil zu reduzieren, werden hochnickelhaltige Kathodenmaterialien in den nächsten Jahren den Markt dominieren, wofür derzeit die Förderkapazitäten für Nickel weltweit ausgebaut werden. Das ZSW befasst sich im Rahmen des BMBF-Dachkonzepts Batterie intensiv mit der Charakterisierung solcher Materialien inklusive der hierauf abgestimmten Elektrolyte und Elektroden. Batterien mit hochnickelhaltigen Elektroden sind intrinsisch instabil. Dennoch hat die Industrie gelernt, solche Batterien in sichere Batteriepacks zu verbauen. Dabei helfen auch Zwischenlagen aus Materialien, welche im Schadensfall beispielsweise das Ausbreiten eines Feuers verhindern. Solche sog. Barrierematerialien werden am ZSW entwickelt und im hauseigenen Testzentrum geprüft.

Mittelfristig werden dann Schritt für Schritt manganreiche Kathodenmaterialien mit geringem Nickelanteil und frei von Kobalt in den Markt eingeführt werden. Derartige Materialien werden am ZSW seit vielen Jahre intensiv beforscht und wurden im Projekt ExcellBattMat bereits in den 10-kg-Maßstab hochskaliert. Im Projekt HighSafe werden zusammen mit Partnern aus Deutschland und Taiwan die Materialien in Testbatterien verbaut und auf ihre Sicherheit getestet. Die Weiterentwicklung der Kathodenmaterialien hat das Ziel, die spezifischen Kosten in Euro pro Kilowattstunde zu senken und gleichzeitig die Energiedichte in Euro/Liter und Euro/kg noch weiter zu erhöhen. Diese Entwicklung verlief und verläuft immer noch stürmisch und hat in den letzten Jahren maßgeblich dazu beigetragen, die Kosten für Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen deutlich zu senken und gleichzeitig deren Reichweite deutlich zu erhöhen.

In order to reduce the cobalt content, high-nickel cathode materials will dominate the market in the next couple of years, and in preparation the extraction capacities for nickel are currently being expanded worldwide. ZSW is focusing intensively on the characterisation of such materials, including the electrolytes and electrodes designed for them, as part of the BMBF's umbrella concept for batteries. Batteries with high-nickel electrodes are intrinsically unstable. Nevertheless, the industry has learned to assemble these batteries into safe battery packs, for example by incorporating intermediate layers of materials that prevent the spread of fire in the event of damage. These so-called barrier materials are being developed at ZSW and inspected at the in-house test centre.

In the medium term, manganese-rich cathode materials with a low nickel content and without cobalt will be introduced to the market step by step. Such materials have been intensively researched at ZSW for many years and have already been scaled up to the 10-kg scale in the ExcellBattMat project. In the HighSafe project, the materials are being installed in test batteries together with partners from Germany and Taiwan and tested for their safety. The further development of the cathode materials has the objective of reducing the specific costs in euros per kilowatt hour and at the same time further increasing the energy density in euros/litre and euros/kg. This development has been, and still is, progressing at a breakneck pace and has made a significant contribution in recent years towards substantially reducing the cost of lithium-ion batteries in vehicles while, at the same time, significantly increasing their range.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Kathodenmaterialien in der Lithium-Ionen-Batterie und die stark zunehmenden Produktionsvolumina waren die maßgeblichen Treiber, welche zu hochwertigen und erschwinglichen Batterien geführt haben. Parallel hierzu wurden in den letzten Jahren auch die Arbeiten zu alternativen Anodenmaterialien auf Basis von Silizium intensiviert. Das ZSW nimmt sich im Projekt SiDrive dieses Themas an und arbeitet an der Kombination von kobaltfreien, energiereichen Kathodenmaterialien mit neuartigen Siliziumanoden.

The continuous development of cathode materials in lithium-ion batteries and the rapidly rising production volumes were the main drivers that led to high-quality and affordable batteries. At the same time, work on alternative anode materials based on silicon has also been ramped up in recent years. ZSW is addressing this research topic in the SiDrive project and is working on pairing cobalt-free, high-energy cathode materials with novel silicon anodes.

DIE FRAGE DES ZELLFORMATS

Aber auch außerhalb der Materialien erfährt die Lithium-Ionen-Batterie derzeit an vielen Stellen ein Redesign. Dabei wird immer klarer, dass es ein einheitliches Batterieformat nicht gibt. Heute und zukünftig dürften vermutlich drei große Zellformattypen gebaut werden: Rundzellen, die z. B. von Tesla eingesetzt und weiterentwickelt werden, prismatische Hardcase-Zellen, wie sie VW in den eigenen Batterien einsetzen wird, und die Pouchzellen, die primär von koreanischen Anbietern wie Samsung SDI, SK Innovation oder LG Chem produziert werden. Aber es gibt auch Entwicklungen weg von diesen Standards: Im Projekt Agilobatt wird untersucht, ob auf einer flexiblen Produktionsstraße Batterien ganz unterschiedlicher Geometrien exakt passend für jeweils individuelle Endgeräte kostengünstig gefertigt werden können.

A QUESTION OF CELL FORMAT

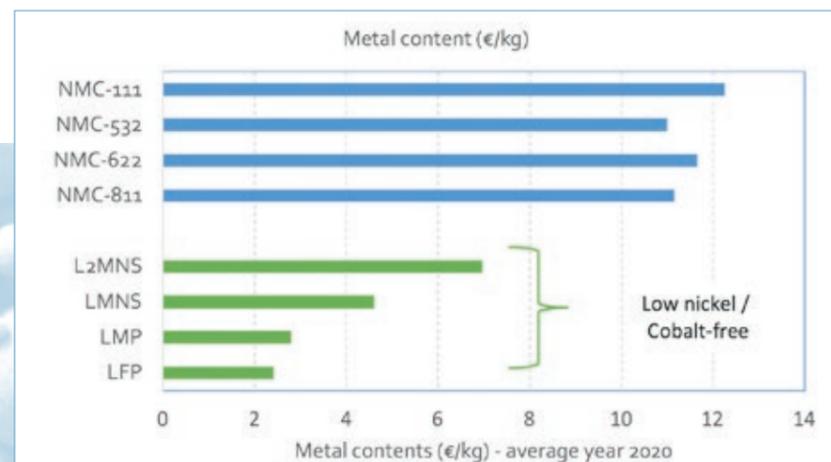
The lithium-ion battery is currently undergoing a redesign in many aspects beyond the materials themselves. It is becoming increasingly clear that there is no single battery format. Today and in the future, three major cell format types are likely to be produced: round cells which are being used and further developed by Tesla, for example prismatic hardcase cells, such as VW will use in its own batteries, and the pouch cells which are primarily produced by Korean suppliers such as Samsung SDI, SK Innovation or LG Chem. But there are also developments departing from these standards: the Agilobatt project is investigating whether batteries of very different geometries could be produced cost-effectively on a flexible production line to precisely fit individual end devices.

NMP-FREIE ELEKTRODEN

Im Projekt Tropex geht es um die Substitution toxischer Lösungsmittel, insbesondere des N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP), welches bei der Beschichtung von Batterieelektroden eingesetzt wird. NMP gilt unter der Europäischen Chemiegeseztgebung (REACH) als „besonders besorgniserregender und fortpflanzungsgefährdender Stoff“ mit der dringenden Aufforderung des Gesetzgebers, von der Verwendung abzusehen bzw. intensiv nach Substitutionsmaterialien zu suchen. Im Projekt TROPEX versuchen WissenschaftlerInnen am ZSW, diesbezüglich einen Königsweg zu finden, indem sie nicht nur komplett auf NMP verzichten, sondern on top sogar das teure flüssigkeitsbasierte Beschichtungsverfahren für Batterieelektroden

NMP-FREE ELECTRODES

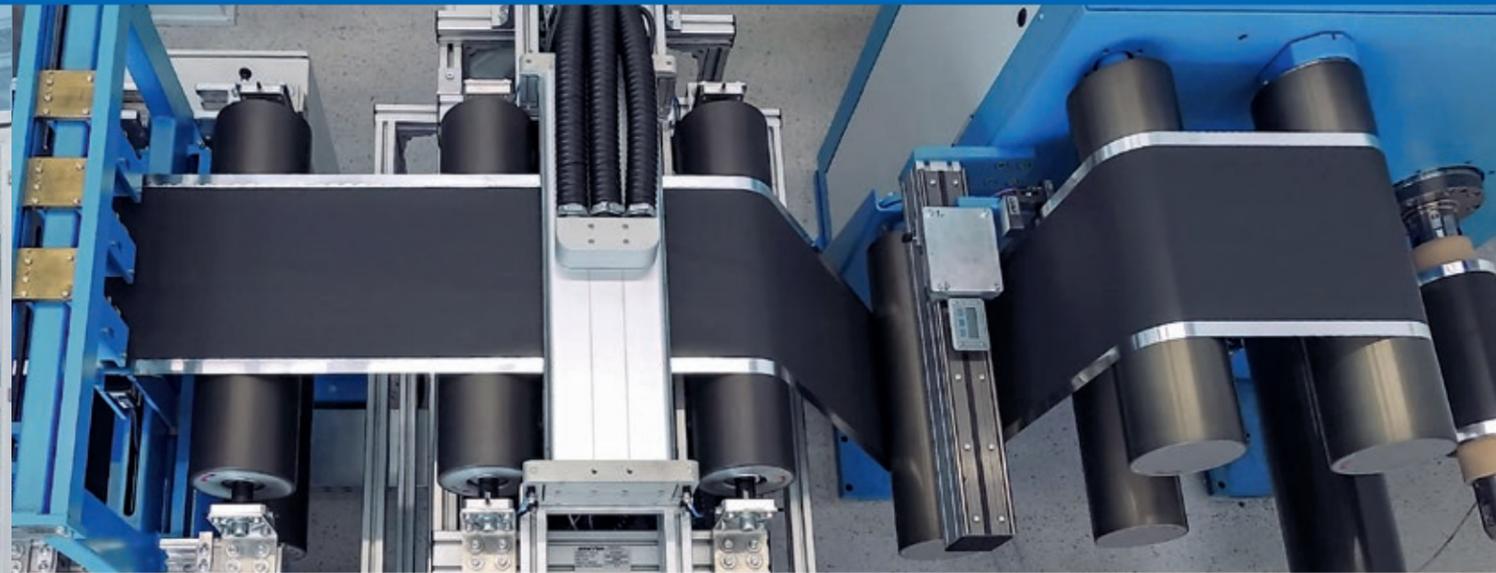
The Tropex project is investigating the substitution of toxic solvents, especially N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) which is used in the coating of battery electrodes. NMP is considered a “substance of very high concern and toxic for reproduction” under the European chemicals legislation (REACH), with the urgent request to refrain from its use or search intensively for substitute materials. Within the TROPEX project, ZSW researchers are trying to find the iconic silver bullet by not only completely eliminating NMP but, on top of that, even fully avoiding the expensive liquid-based coating process for battery electrodes.



// Die Metallanteile der Kathodenmaterialien bestimmen maßgeblich den Preis der Batterien.
// The metal content of the cathode materials largely determines the price of the batteries.



// Forschungsanlage, um Elektroden in einem Schritt trocken zu extrudieren, prozessieren und in der Zelle weiterzuverarbeiten.
// Research plant to dry extrude, process and further finish electrodes in the cell in one step.



komplett zu eliminieren. Dazu wird die Elektrode in einem Schritt trocken extrudiert, prozessiert und in der Zelle weiterverarbeitet. Das ZSW hat die hierfür notwendigen Extruder installiert und wird nun diese Technologie zum Proof of Concept weiterentwickeln.

POTENZIALE IN DER PRODUKTION

Bei der mechanischen Fertigung von Batterien forscht das ZSW ebenfalls an Verbesserungspotenzialen. Hier wird untersucht, wie sich die Endperformance einer Batterie mit den einzelnen Fertigungsschritten in Zusammenhang bringen lässt. Im Projekt Rollbatt versuchen die WissenschaftlerInnen des ZSW, verbesserte Rundzellen herzustellen, wie sie z. B. Tesla in seinen Fahrzeugen einsetzt. Dabei geht es darum, die Produktionsraten solcher Batterien zu erhöhen und gleichzeitig den elektrischen Widerstand der so hergestellten Batteriezellen deutlich abzusenken.

Bei der Produktion von Batterien für automobiler Anwendungen handelt es sich um Hochdurchsatzprozesse mit kurzen Zykluszeiten. Gerade deshalb ist eine detaillierte Qualitätskontrolle von existenzieller Bedeutung. Off-spec-Raten müssen im ppm-Bereich liegen und jede Zelle muss bezüglich eingesetzter Materialien rückverfolgbar sein. Derartige Themen werden im Projekt DigiBattPro erforscht. Dennoch kann es immer wieder zu Inhomogenitäten in einzelnen Batterien kommen. Wie viel davon erlaubt oder eben nicht erlaubt werden kann, das klären die ZSW-ForscherInnen im Projekt GRadiBatt.

SCHNELLADUNG OPTIMIEREN

Ein weiteres Projekt am ZSW befasst sich mit einer Verbesserung der Schnellladefähigkeit von Batterien. Hierdurch soll erreicht werden, dass Batterien in weniger als zehn Minuten geladen werden können (Projekt Structure.e). Bei der Fragestellung der Schnellladefähigkeit sind rasche Fortschritte notwendig, um den Aufbau der Ladeinfrastruktur in die richtige Richtung zu lenken: Es geht um nicht mehr oder weniger als die Frage, ob für Elektrofahrzeuge in Deutschland zukünftig mehrere Millionen individuelle Wallboxen notwendig werden oder eine Transformation des Tankstellennetzes mit nur 14.000 Stationen in Schnelladeparks ausreichend sein wird.

For this purpose, the electrode is dry extruded, processed and finished within the cell in a single step. ZSW has installed the required extruders and will now develop this technology into a proof of concept.

POTENTIALS IN PRODUCTION

ZSW is also researching potential improvements related to the mechanical production of batteries. The researchers are investigating the relationship between the final performance of a battery and the individual production steps. In the Rollbatt project, ZSW researchers are trying to produce improved round cells, such as those used by Tesla in its vehicles. The aim is to increase the production rates of such batteries and at the same time significantly lower the electrical resistance of the battery cells produced in this way.

Manufacturing batteries for automotive applications is a high-throughput process with short cycle times. This is precisely why detailed quality control is of existential importance. Off-spec rates must be in the ppm range and each cell must be traceable with regard to the materials used. These kinds of issues are being researched in the DigiBattPro project. Nevertheless, there can always be inhomogeneities in individual batteries. Within the GRadiBatt project, ZSW researchers are determining how much can or cannot be tolerated.

OPTIMISING FAST CHARGING

Another project at ZSW is concerned with improving the fast-charging capability of batteries. The goal is to create batteries that can be charged in less than 10 minutes (Structure.e project). Rapid progress is needed when it comes to the issue of fast-charging capability in order to steer the development of the charging infrastructure in the right direction: at issue is the question of whether several million individual wall boxes will be necessary for electric vehicles in Germany in the future, or if a transformation of the petrol station network consisting of only 14,000 stations into fast-charging parks will be sufficient.

PERFORMANCE-NACHWEIS UNTER PRODUKTIONSNAHEN BEDINGUNGEN

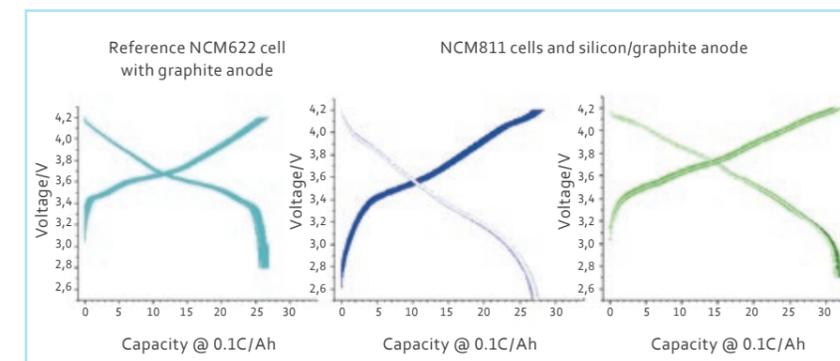
PERFORMANCE VERIFICATION UNDER CLOSE-TO-PRODUCTION CONDITIONS

Als einziges Forschungsinstitut in Deutschland verfügt das ZSW mit der „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Batterien (FPL)“ über eine Pilotanlage zur seriennahen Produktion von Batteriezellen in einem Format, wie es auch in batteriebetriebenen Pkw eingesetzt wird. Zahlreiche der vorstehend aufgeführten Entwicklungen werden in Komponenten oder Batteriezell-Designs münden, die dann abschließend auf der FPL ihren finalen Proof of concept erhalten werden.

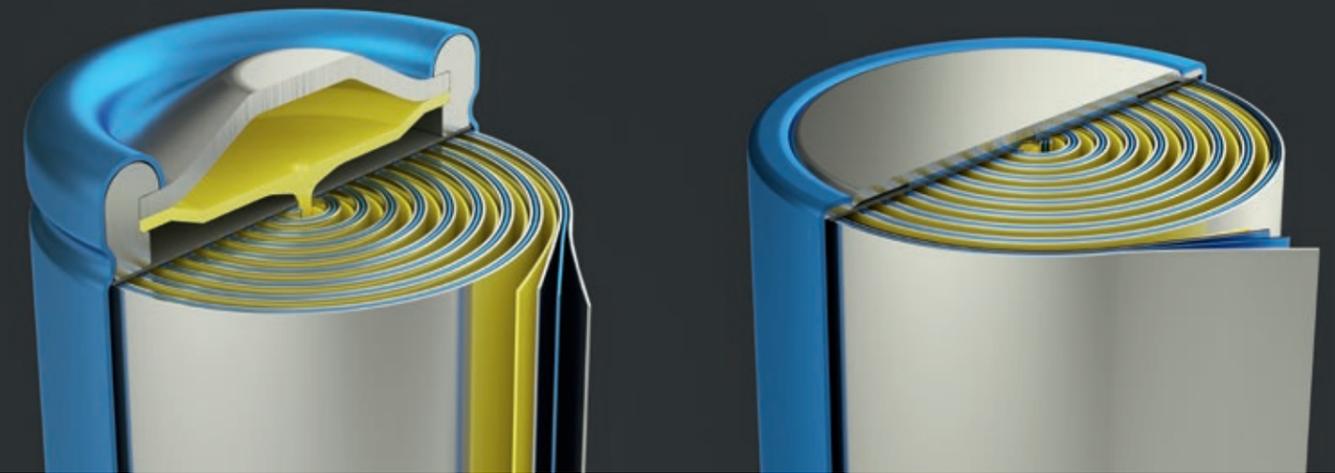
Die FPL ist sehr stark in die deutsche Forschungslandschaft für Batterien und Batteriematerialien integriert und übernimmt den finalen Proof of Concept auch für Entwicklungen, welche an anderen Universitäten oder Forschungseinrichtungen laufen. Aktuell erfährt die FPL im Rahmen des Projektes ZellkoBatt ein technisches Upgrade und wird für alternative Zellformate wie Pouchzellen oder gestapelte prismatische Zellen ertüchtigt. Insbesondere das hochpräzise und schnelle Stapeln einzelner Elektroden- und Separatorlagen stellt die Entwickler der FPL vor große Herausforderungen, die sie im Projekt STACK aktuell angehen. Mit dem Ergebnis aus diesem Projekt können auf der umgebauten FPL dann alle derzeit gängigen automobilen Batterieformate dargestellt werden.

With the “Research Platform for the Industrial Production of Large-Format Lithium-Ion Batteries (FPL)”, ZSW is the only research institute in Germany with a pilot plant for the near-series production of battery cells in a format that is also used in battery-powered passenger cars. Many of the developments listed above will result in components and battery cell designs that will undergo their final proof of concept at FPL.

FPL is very closely integrated into the German research landscape for batteries and battery materials and also handles the final proof of concept for developments that are underway at other universities or research institutions. FPL is currently undergoing a technical upgrade as part of the ZellkoBatt project and will then also be able to produce alternative cell formats such as pouch cells or stacked, prismatic cells. In particular the high-precision and rapid stacking of individual electrode and separator layers poses great challenges for the developers at FPL, a problem they are currently tackling in the STACK project. The result of this project will enable all currently common automotive battery formats to be reproduced on the retrofitted FPL.



// Neue Anoden/Kathodenkombinationen für PHEV-1-Zellen erhöhen die Zellkapazität um über 25%.
 // New anode/cathode combinations for PHEV-1 cells increase cell capacity by more than 25%.



DAS RECYCLING VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

RECYCLING LITHIUM-ION BATTERIES

Es ist unbestritten, dass in den letzten zehn Jahren der Schwerpunkt der wissenschaftlichen und industriellen Entwicklung bei Lithium-Ionen-Batterien auf einer Erhöhung der Energiedichte bei gleichzeitiger Senkung der Kosten lag. Mit zunehmendem Erfolg der Elektromobilität und der Massenproduktion der Batterien rückt nun auch die End-of-Life-Diskussion in den Vordergrund.

Diese Diskussion ist getrieben durch gesetzliche Rahmenbedingungen, die abhängig von der jeweiligen Region oder Land eine Recyclingquote von bis zu 80% bei der Verschrottung von (Elektro-)Pkw fordern. Zudem sind die in der Lithium-Ionen-Batterie eingesetzten Materialien viel zu wertvoll, um nicht wiederverwertet zu werden. Obwohl sie keinerlei Edelmetalle enthalten, so sind es doch die schieren Massen an Buntmetallen (Kupfer, Nickel, Kobalt), Aluminium und das Lithium in einer Batterie, welche das Recycling bereits aufgrund dieser Metallwerte lukrativ machen: So enthält eine Tonne nickelhaltiges Gestein aus einer Nickelmine nur ca. 20 kg Nickel. In der Batterie eines Tesla-Model 3 sind hingegen bereits 60 kg Nickel enthalten. Bei einem Batteriegewicht von 500 kg entspricht dies einer fünffachen Anreicherung dieses Metalls im Vergleich zur Mine. Bei Lithium ist dieser Faktor noch viel höher: 6 kg Lithium in einer Batterie ersparen beim erfolgreichen Recycling das Aufarbeiten mehrerer Tausend Kubikmeter an Li-haltiger Salzlösung.

Looking back at the last decade, there is no doubt that the focus of scientific and industrial development in the area of lithium-ion batteries has been on increasing energy density while reducing costs. Now, with the ongoing success of electromobility and the mass production of batteries, the end-of-life discussion is moving to the forefront.

This discussion is driven by legal framework conditions that, depending on the respective region or country, demand a recycling rate of up to 80% when scrapping (electric) cars. Either way, the materials used in the lithium-ion battery are far too valuable not to be recycled. Although they do not contain any precious metals, it is the sheer amount of non-ferrous metals (copper, nickel and cobalt), aluminium and lithium in batteries that makes recycling lucrative: for example, one tonne of nickel-containing rock from a nickel mine contains only about 20 kg of nickel. In contrast, the battery in a Tesla Model 3 contains 60 kg of nickel. With a total battery weight of 500 kg, this is five times the enrichment of that metal compared to the mine. For lithium, this factor is even higher: 6 kg of lithium in a battery means that successful recycling saves the processing of several thousand cubic metres of salt solution containing lithium.

MEHR ALS NUR METALLE ZURÜCKGEWINNEN

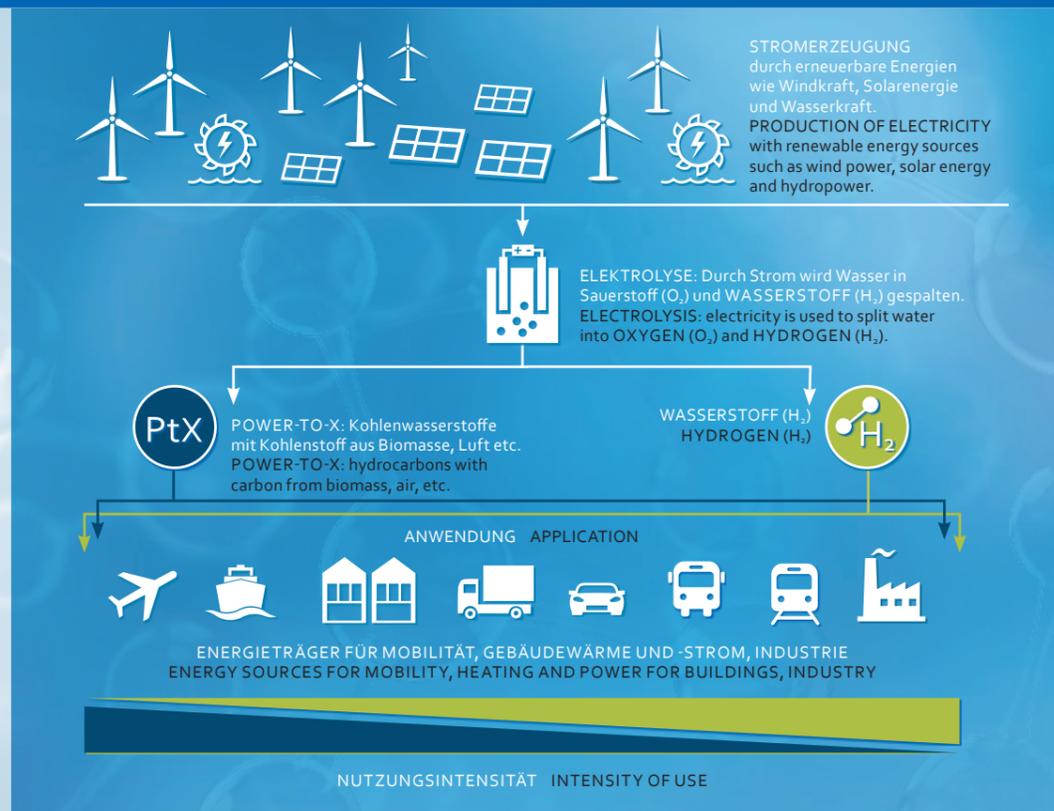
Aktuell werden die wenigen Lithium-Ionen-Batterien, die zum Recycling kommen, in bestehende Anlagen zur Buntmetallrückgewinnung gegeben. Dabei kann ein Großteil der Buntmetalle wie Kobalt, Nickel oder Kupfer zurückgewonnen werden, während das Lithium in der Schlacke dieses Prozesses verloren geht. Da dieser Zustand nicht zufriedenstellend ist und gerade das Lithium unbedingt recycelt werden muss, wurden in den letzten Jahren alternative Szenarien erarbeitet und Verfahren vorentwickelt. So stellt sich der aktuell am intensivsten beforschte Prozess wie folgt dar: Die Batterien werden dezentral gesammelt, tiefentladen und dann teilautomatisiert in Module und Zellen zerlegt. Dabei können Gehäuseteile und Kabel bereits sortenrein gesammelt werden. Die Zellen werden dann mechanisch unter Stickstoff zerkleinert und die Separator-, Kupfer- und Aluminiumfolien über Verfahren der Windsichtung abgetrennt. Es verbleibt ein sogenanntes „Schwarzes Pulver“, also eine Mischung aus Kathoden- und Anodenmaterial sowie Elektrolyt.

Mittels Vakuumbehandlung bei höherer Temperatur kann der Elektrolyt entzogen werden. Das trockene Schwarze Pulver wird dann nasschemisch weiter aufgearbeitet. Dabei wird es zuerst in Schwefelsäure aufgelöst und danach werden die Metalle einzeln abfraktioniert. Für Nickel und Kobalt können dabei bereits heute Recyclingraten von > 85% erreicht werden, während dieser Wert bei Lithium aktuell eher um 70% liegt. Als problematisch stellen sich Spuren von Fluor heraus, die über das Li-haltige Leitsalz und diverse Binder beim Bau der Batterie in die Zelle gelangen. Fluor und fluorhaltige Verbindungen lassen sich im Recyclingprozess nur schwer abtrennen und schleppen sich durch alle Prozessstufen, was der Reinheit der zu gewinnenden Metalle nicht förderlich ist. Im Projekt RecycleBatt, das vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg gefördert wird, versucht das ZSW einen anderen Recyclingweg zu bewerten, bei dem aus dem Schwarzen Pulver heraus direkt die Anoden- und Kathodenmaterialien zurückgewonnen werden sollen, die dann in weniger anspruchsvollen Batterien wie z. B. in der stationären Stromspeicherung, direkt wieder verbaut werden können.

MORE THAN JUST RECOVERING METALS

At present, the few lithium-ion batteries that are recycled are sent to existing plants to recover their non-ferrous metals. During this process, a large portion of the non-ferrous metals such as cobalt, nickel or copper can be recovered, while the lithium is lost in the slag. Since the situation is not satisfactory and the lithium especially needs to be recycled, alternative scenarios have been devised and a number of processes have been pre-developed in recent years. The now most intensively researched process is as follows: the batteries are collected decentrally, deep discharged and then semi-automatically dismantled into modules and cells. Housing components and cables can already be collected separately. The cells are then mechanically crushed in a nitrogen atmosphere and the separator, copper and aluminium foils are separated using an air separation processes. What remains is a so-called "black powder", that is a mixture of cathode and anode material as well as electrolyte.

The electrolyte can be removed by vacuum treatment at a higher temperature. The dry black powder is then processed further using a wet chemical process. It is first dissolved in sulphuric acid and then the metals are individually fractionated. Recycling rates of > 85% can already be achieved for nickel and cobalt, while this value is currently closer to 70% for lithium. One problem is that traces of fluorine enter the cell via the lithium-containing conducting salt and various binders during battery construction. Fluorine and fluorine-containing compounds are difficult to eliminate during the recycling process and remain through all process stages, affecting the purity of the metals being recovered. In the RecycleBatt project, funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, ZSW is trying to evaluate a different recycling route whereby the anode and cathode materials are recovered directly from the black powder to then be directly reused in less demanding batteries such as those used for stationary electricity storage.



Brennstoffzellenfahrzeuge bieten lange Reichweiten und kurze Betankungszeiten, wie sie von batteriebetriebenen Fahrzeugen heute nicht erreicht werden. Sie fahren ebenfalls völlig emissionsfrei und in Abhängigkeit von der Quelle des eingesetzten Wasserstoffs ist sogar eine völlige CO₂-Neutralität darstellbar.

Fuel cell vehicles offer long ranges and short refuelling times that are currently unmatched by battery-powered vehicles. They also run entirely emission-free and, depending on the source of the hydrogen used, full CO₂ neutrality is actually possible.

GRÜNER WASSERSTOFF UND GRÜNE KOHLENWASSERSTOFFE
Wasserstoff wird zukünftig ein Hauptenergieträger werden und somit auch in der Fläche zur Verfügung stehen. Nachteilig bei dem Einsatz von Wasserstoff im Vergleich zur batterieelektrischen Mobilität sind die Effizienzverluste bei der Erzeugung und Kompression des Wasserstoffs wie auch der im Vergleich zur Batterie geringere Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im Fahrzeug. Sind jedoch große Reichweiten und kurze Betankungszeiten zwingend notwendig, wie z. B. im Schwerlastverkehr, dann stellen Brennstoffzellen eine valide Alternative für heutige Verbrennungsmotoren dar.

GREEN HYDROGEN AND GREEN HYDROCARBONS
Hydrogen will become a major energy carrier in the future and will therefore also be available on a large scale. The disadvantages of hydrogen in comparison to battery-electric mobility are the efficiency losses during the production and compression of hydrogen as well as the lower efficiency of the installed fuel cell compared to the battery. However if long ranges and short refuelling times are absolutely necessary, such as in heavy-duty traffic, then fuel cells are a valid alternative to today's internal combustion engines.

Flüssige Biokraftstoffe wie Biodiesel oder Bioethanol haben als Zudosierung für Diesel oder Benzin im Umfang von 5–10% bereits Eingang in den Alltag gefunden. Jedoch sind derartige Kraftstoffe vor allem aufgrund des Einsatzes von Mineraldüngern bei der Aufzucht der Energiepflanzen (Mais, Zuckerrüben, Zuckerrohr etc.) nicht als CO₂-neutral einzustufen.

Liquid biofuels such as biodiesel or bioethanol have already found their way into everyday life as additives for diesel or petrol in the range of 5–10%. However, such fuels cannot be classified as CO₂-neutral, mainly because of the use of mineral fertilisers in the cultivation of energy crops (maize, sugar beet, sugar cane, etc.).

Weiterhin in der Entwicklung sind sogenannte Power-to-X-(PtX-) Kraftstoffe. Diese sog. eFuels, also z. B. Methan, Diesel oder Kerosin auf Basis von CO₂ und aus erneuerbarem Strom mittels Elektrolyse hergestelltem „grünem“ Wasserstoff können in solchen Bereichen zum Einsatz kommen, die nicht vollständig elektrifizierbar sind oder in denen Wasserstoff nicht direkt genutzt werden kann. Das sind z. B. Kraftstoffe für den Flug-, Schiffs- und Bahnverkehr. PtX-Prozesse können außerdem Rohstoffe für die chemische Industrie erzeugen oder als saisonaler Energiespeicher eingesetzt werden.

Power-to-X (PtX) fuels are still being developed. These so-called eFuels, for example methane, diesel or kerosene are produced on the basis of CO₂ and "green" hydrogen generated from renewable electricity by means of electrolysis. They can be used in areas that cannot be fully electrified or where hydrogen cannot be used directly, for example fuels for aviation, shipping and rail transport. PtX processes can also produce raw materials for the chemical industry or be used as seasonal energy storage systems.

Für die Kohlenwasserstoffsynthese bedarf es neben Wasserstoff auch Kohlenstoff in Form von CO₂, das bevorzugt aus regenerativen Punktquellen (z. B. Biogas- oder Bioethanolanlagen) entnommen, künftig aber zur Bereitstellung großer CO₂-Mengen auch aus der Luft gewonnen werden muss. Nur dann können derartige PtX-Kraftstoffe auch als CO₂-neutral eingestuft werden. Als eine günstige Überbrückungsstrategie bis zur Verfügbarkeit technisch ausgereifter Verfahren zur großskaligen CO₂-Gewinnung aus der Luft kann dabei auch die Nutzung von hochkonzentrierten CO₂-Strömen aus der Industrie in Betracht gezogen werden. So wird z. B. bereits

In addition to hydrogen hydrocarbon synthesis also requires carbon in the form of CO₂, which is preferably taken from regenerative point sources (for example, biogas or bioethanol plants), but in the future will also have to be extracted from the air to provide larger quantities of CO₂. Only then could such PtX fuels be classified as CO₂-neutral. Using highly concentrated CO₂ streams from the industry could also be considered as a favourable bridging strategy until technically mature processes for large-scale CO₂ extraction from the air are available. For example, the conversion of CO₂ from the exhaust gases of the

WIRD ES BEI DER LITHIUM-IONEN-BATTERIE BLEIBEN?

WILL THE LITHIUM-ION BATTERY REMAIN?

Diese Frage wird intensiv diskutiert. Einig sind sich Wissenschaft und Industrie dabei, dass die Potenziale dieser Technologie noch lange nicht ausgereizt sind. Weitere Kostensenkungen bei weiter zunehmenden Energieinhalten und verbessertem Kundennutzen (Reichweite im Pkw, Schnellladefähigkeit) werden schon bald realisiert sein. Das vollständige Recycling der Batterien sowie der Verzicht auf Kobalt und die Reduktion des Nickelgehalts werden den Vorsprung dieser Batterietechnologie weiter erhöhen.

This question is the subject of intense debate. Science and industry both agree that the potential of this technology is still far from exhausted. Further cost reductions and improved energy content and customer benefits (range and fast-charging capability) will soon be realised. Recycling the batteries in full, dispensing with cobalt and reducing the nickel content will further sharpen the competitive edge of this battery technology.

Letztendlich kann nur die verfügbare Menge an kostengünstigem Lithium den Einsatzbereich dieser Batterie limitieren. Deshalb ist die frühzeitige Suche nach alternativen Batteriesystemen ohne Lithium eine Pflicht und auch das ZSW ist mit dem Projekt TRANSITION daran beteiligt. In diesem Projekt soll Natrium an Stelle des Lithiums als aktive Batteriekomponente treten, da Natrium in der Natur quasi unbegrenzt verfügbar ist – z. B. als Teil des Meersalzes. Aber auch Batterien auf Basis von Magnesium oder Kalzium werden am ZSW innerhalb des Exzellenzclusters für Post-Lithium-Batterien POLiS beforscht.

Ultimately, only the available amount of low-cost lithium could limit this battery's range of application. Therefore a timely search for alternative battery systems without lithium is imperative, and ZSW is actively involved with the search in the TRANSITION project. The project seeks to replace lithium with sodium as the active battery component, since sodium is available in nature in virtually unlimited quantities – for example, in sea salt. Batteries based on magnesium or calcium are also being researched at ZSW within the POLiS (Post-Lithium Storage) Cluster of Excellence.

EIN BLICK AUF DIE ALTERNATIVEN

Der politisch bedingte Wille zum Erfolg der Elektromobilität auf Basis von Lithium-Ionen-Batterien in China hat andere alternative Antriebstechniken mit CO₂-Reduktionspotenzial in den Hintergrund treten lassen. Hierzu zählen der in der Vergangenheit in Europa teilweise massiv geförderte Einsatz von Erdgas oder LPG als Kraftstoff oder Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit komprimiertem Wasserstoff betrieben werden. Während Erdgas als Kraftstoff heute keine Zukunft mehr eingeräumt wird, erleben Brennstoffzellen gerade eine Renaissance.

A LOOK AT THE ALTERNATIVES

The politically driven support in China for electromobility based on lithium-ion batteries has sidelined other alternative drive technologies with CO₂-reduction potential. These include natural gas or LPG as fuel, which have been massively funded in Europe in the past, or fuel cell vehicles that run on compressed hydrogen. While natural gas as a fuel is no longer considered to have a future, fuel cells are currently experiencing a renaissance.

in Pilotprojekten die Umsetzung von CO₂ aus den Abgasen der Zementindustrie mit Elektrolyse-Wasserstoff zu Flugbenzin untersucht. Mit solchen Prozessen lässt sich in einer Übergangszeit emittiertes CO₂ quasi nochmals verwerten und somit auch eine merkliche Reduktion der gesamten Emissionen erzielen.

cement industry using electrolysis-sourced hydrogen to produce aviation fuel is already being investigated in pilot projects. With such processes, CO₂ emitted during a transitional period could effectively be recycled again and thus also bring about a noticeable reduction in overall emissions.

DER KREIS SCHLIESST SICH UND ERÖFFNET PERSPEKTIVEN THE CIRCLE CLOSES AND OPENS UP NEW PERSPECTIVES

Lithium-Ionen-Batterien sind ein Schlüssel für die zukünftige Mobilität ohne Emissionen. Bereits heute ist ersichtlich, dass sie das tragende Antriebskonzept im Pkw-Bereich sein werden. Das zeigte sich nicht zuletzt in der zweiten Jahreshälfte 2020 in einer rasanten Zunahme der Zulassungszahlen an Elektrofahrzeugen. Bei dieser Entwicklung mitten im Covid-19-Jahr 2020 hat auch die Bundesregierung mit ihrer Subventionspolitik in Höhe von bis zu 9.000 Euro je Elektro-Pkw ein starkes Zeichen gesetzt, was dazu geführt hat, dass sich die Zahl der neu zugelassenen Elektro-Pkw insbesondere in der zweiten Jahreshälfte 2020 stark erhöht hat. So wurden im Gesamtjahr 2020 in Deutschland fast 200.000 Fahrzeuge mit ausschließlichem Batterieantrieb (BEV) oder mit einer Kombination aus großer Batterie und Verbrennungsmotor (PHEV) verkauft – ein Plus von 200 % im Vergleich zum Vorjahr. Dieses Plus fällt noch eindrücklicher aus, wenn man gleichzeitig den Rückgang der Zulassungszahlen für Benzin- (-36 %) und Dieselfahrzeuge (-29 %) in die Rechnung einbezieht. Eine Verlängerung der staatlichen Kaufprämie, eine zunehmende Anzahl an Fahrzeugmodellen, ein dichteres Netz an Ladesäulen sowie eine weitere Reduktion der Batteriekosten werden den Markthochlauf dieser Technologie weiter beschleunigen. Zudem üben die anspruchsvollen CO₂-Ziele der EU (95 g/km im Jahr 2020) mit den hiermit verbundenen hohen Strafzahlungen bei Nichterfüllung Druck auf die Automobilproduzenten aus. Und noch ein Rekord wurde im Covid-19-Jahr 2020 in Europa aufgestellt: Erstmals wurden mit 1,37 Mio. batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV und PHEV) mehr Zulassungen verzeichnet als in der Volksrepublik China mit 1,25 Mio. Elektrofahrzeugen.

EIN BLICK IN DIE ZUKUNFT

Für die nächsten zehn Jahre lassen sich die folgenden drei Entwicklungen vorhersehen:

- 1) Die Lithium-Ionen-Batterien werden billiger und in ihrer Performance noch besser werden. Dies führt zu längeren Reichweiten der Pkw, geringeren Anschaffungskosten und verbesserter Schnellladefähigkeit.
- 2) Das Batterierecycling wird etabliert sein und hohe Wiedergewinnungsraten ermöglichen. Hiermit wird der Druck auf die natürlichen Ressourcen reduziert und auch die CO₂-Bilanz bei der Batterieherstellung deutlich verbessert.
- 3) Stromerzeugung wird noch regenerativer und somit CO₂-ärmer werden.

Lithium-ion batteries are a key to future emission-free mobility. It is already clear that they will be the main drive concept in the passenger car sector. This was already evident in the rapid increase in the number of new electric vehicle registrations in the second half of 2020. In the midst of this development in the COVID-19 year 2020, the German government sent a strong signal with its subsidy policy of up to 9,000 euros per electric car which has led to a sharp rise in the number of newly registered electric cars especially in the second half of 2020. In the whole of 2020, for example, almost 200,000 vehicles with battery-only drive systems (BEV) or with a combination of large battery and combustion engine (PHEV) were sold in Germany – an increase of 200% compared to the previous year. This increase is all the more impressive when taking into account the decline in registrations of petrol (-36%) and diesel (-29%) vehicles. An extension of the government purchase premium, an increasing number of vehicle models, a denser network of charging stations and a further reduction in battery costs will all further accelerate the market ramp-up of this technology. Moreover, the EU's ambitious CO₂ targets (95 g/km in 2020) and the associated high penalties for non-compliance are putting pressure on car manufacturers. And yet another record was set in Europe in the COVID-19 year 2020: for the first time 1.37 million battery electric vehicles (BEV and PHEV) were registered, more than in the People's Republic of China with 1.25 million electric vehicles.

A LOOK INTO THE FUTURE

The following three developments can be predicted for the next ten years:

- 1) Lithium-ion batteries will become cheaper and perform even better. This will lead to longer car ranges, lower purchase costs and improved fast-charging capabilities.
- 2) Battery recycling will be well established, making high recovery rates possible. This will reduce pressure on natural resources and significantly improve the carbon footprint of battery production.
- 3) Power generation will become even more renewable and therefore less carbon-intensive.



Es ist gut, dass alle diese Prozesse parallel verlaufen, da nur durch deren Kombination eine optimale Reduktion der CO₂-Emissionen erzielt werden kann.

Wie bei vielen neuen Technologien waren die ersten zehn Jahre der Kommerzialisierung von Elektrofahrzeugen (2010–2020) eher schleppend, aber es werden sehr viel dynamischere Jahre folgen. Der Green Deal der EU, das angekündigte „Verbrenner-Aus“ in zahlreichen Ländern und hohe Strafen auf zu hohe CO₂-Emissionen in der Neuwagenflotte werden die Marktdurchdringung von batteriebetriebenen Pkw antreiben. Brennstoffzellenantriebe im Schwerlastbereich und ggf. flüssige eFuels im Luftverkehr haben das Potenzial, sich außerhalb der Batterien merkliche Marktanteile bei zukünftigen Antrieben zu sichern.

Das ZSW ist mit seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, seinen Anlagen und seinen Forschungsprojekten im Zentrum dieser dynamischen Entwicklungen unterwegs. Die Arbeiten des ZSW, von denen in diesem Fokus-Bericht nur einige öffentlich geförderte Projekte genannt sind und nicht die zahlreichen direkten Kooperationen mit Industriepartnern, werden ihren Anteil am Erfolg der Lithium-Ionen-Batterie haben. Das zähe Forschen von drei Wissenschaftlern, das seine Belohnung im Nobelpreis 2019 fand, der Mut der Firma Sony im Jahr 1990, diese Batterie zu kommerzialisieren, und das Risiko einiger Autohersteller, bereits früh erste Fahrzeuge mit dieser Batterie anzubieten, haben den Erfolg der Lithium-Ionen-Batterien eingeleitet. Die stetige Verbesserung dieses Batterietyps, die noch für viele Jahre weitergehen wird, lässt die Aussage zu, dass mit der Lithium-Ionen-Batterie eine der wichtigsten technischen Lösungen für eine CO₂-freie Mobilität zur Verfügung steht.

It is fortunate that these are all parallel processes, since an optimal reduction of CO₂ emissions can only be achieved by combining all of them.

As with many new technologies the first ten years of electric vehicle commercialisation (2010-2020) were rather slow, but now far more dynamic years will follow. The EU's Green Deal, the announced "internal combustion phase-out" in many countries and high penalties on excessive CO₂ emissions from new car fleets will help drive the market penetration of battery-powered passenger cars. Fuel cell drives in the heavy-duty sector and possibly liquid eFuels in aviation have the potential to secure noticeable market shares besides batteries in future drives.

With its staff, its facilities and its research projects, ZSW is at the centre of these dynamic developments. The work carried out by ZSW, described via a selection of publicly funded projects in this Focus Report, is also supported by numerous direct collaborations with industry partners and contributes to the success story of the lithium-ion battery. The tenacious research effort of three scientists, which culminated in the 2019 Nobel Prize, Sony's courage in commercialising this battery type in 1990 and the risk taken by some car manufacturers to offer the first vehicles with this battery type at an early stage have all ushered in the success of lithium-ion batteries. The ongoing improvement of this type of battery will continue for many more years securing the role of the lithium-ion battery as one of the most important technical solutions for CO₂-free mobility.

Stuttgart

Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
Germany
Phone: +49 711 7870-0
Fax: +49 711 7870-100

Solar-Testfeld Widderstall

Widderstall 14
89188 Merklingen
Germany
Phone: +49 7337 92394-0
Fax: +49 7337 92394-20

Ulm

Helmholtzstraße 8
89081 Ulm
Germany
Phone: +49 731 9530-0
Fax: +49 731 9530-666

Ulm eLaB

Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm
Germany
Phone: +49 731 9530-500
Fax: +49 731 9530-599

www.zsw-bw.de

info@zsw-bw.de



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2015